

Review of Ms Akerkeh Zadauly's dissertation

“Numerical simulation of a high-speed flow in a combustion chamber with an excited jet injection” presented for defense of the Doctor of Philosophy degree (PhD) in the specialty of Space engineering and technology, specialty code 6D074600

by Prof. U. Maas, scientific consultant for the thesis.

Note: I do not speak Russian. Therefore, my review is based on discussions with the candidate, English texts and summaries that were made available to me, and a MicrosoftWord translation of the thesis into German (which to my surprise gave very good results in terms of the German language produced by the translation). Furthermore, Ms Akerkeh Zadauly presented me her work in detail when we met at a conference in Burabay last September.

Context and relevance of the work:

The work of the thesis is devoted to mathematical and numerical modeling of supersonic turbulent jet injection into a coflow including a deterministic disturbance of the inflow conditions to improve the mixing between jet and flow. This is a fundamental research question in fluid mechanics and aerodynamics.

Supersonic and hypersonic propulsion systems are at the forefront of aerospace engineering, enabling flight at speeds greater than Mach 1 and Mach 5, respectively. These propulsion technologies involve physical phenomena that occur at high velocities, where aerodynamic heating, shock waves, and rapid combustion dynamics govern the processes.

A critical aspect of these propulsion systems is the mixing of turbulent jets, which significantly influences combustion efficiency and engine performance. When fuel is injected into the supersonic or

hypersonic airstream, the resulting turbulent jets enhance the interaction between fuel and oxidizer, promoting rapid and efficient combustion. The complexity of these turbulent flows, characterized by chaotic velocity fluctuations and intricate mixing patterns, poses significant challenges for engineers and scientists. Understanding the mechanisms of turbulent jet mixing is essential for optimizing combustion processes, improving thrust-to-weight ratios, and minimizing harmful emissions. Ongoing research employs advanced computational fluid dynamics and experimental techniques to understand the dynamics of these flows.

One particular problem is a fast mixing of the jet with the coflow, and several methods for mixing enhancement have been proposed (e.g., special nozzles or cavities). Improving the mixing of turbulent jets through perturbations is a promising approach to enhance combustion efficiency and overall performance in propulsion systems. Turbulent jets, characterized by their chaotic flow patterns, inherently possess varying scales of vortices and fluctuations that influence how fuel and oxidizer intermingle. By introducing controlled perturbations—such as oscillations or disturbances at specific frequencies—the flow dynamics can be modified significantly, leading to more effective mixing.

In the thesis LES modelling (“large eddy simulation”) is used for numerical simulations of the mixing process. While the LES equations themselves are well developed, the main problems are the development and choice of adequate initial and boundary conditions capable of generating anisotropic, inhomogeneous, three-dimensional turbulence and the computationally expensive solution of the governing equations.

Based on the simulations, the mechanisms for improving the mixing of an injected supersonic compressible non-isobaric jet with a supersonic co-flow using a deterministic perturbation on the jet based on the LES-averaged three-dimensional Navier-Stokes equations assuming perfect gases (a simplification which decreases the accuracy of the results while still allowing to make qualitative conclusions).

Analysis of the results of the work

In the thesis the results were twofold: On one hand new models for the simulation were developed and on the other hand simulations were performed and analyzed. The results of the analysis were used to derive guidelines for improving the mixing process.

In detail the following results were obtained by Akerkeh Zadauly:

- A numerical model of supersonic turbulent jet injection of a perfect gas into a high-speed coflow was formulated, which is based on three-dimensional spatially averaged Navier-Stokes equations closed by the classical viscous Smagorinsky model, corresponding to a LES. The numerical solution of the system of equations is based on an ENO-scheme “essentially non-oscillating” of third order accuracy.
- Boundary conditions at the inlet were proposed, generating anisotropic inhomogeneous three-dimensional turbulence in a realistic way.
- The boundary conditions were augmented by an additional deterministic perturbation which is used for improved mixing of the jet with co-flow.

- Simulations have been performed for a large range of frequencies and amplitudes of the deterministic perturbations and were analyzed in view of improvement of the mixing
- The influence of the pressure ratios and Mach numbers on the mechanism of formation of the shock waves and the mixing zone have been investigated by numerical simulations for underexpanded supersonic jets in supersonic coflows.
- Promising parameters leading to an improvement of the mixing were identified for the deterministic disturbance in order to improve the mixing.

Ms Akerkeh Zadauly showed in her thesis that the formulated numerical model with extended boundary conditions is capable of modelling three-dimensional natural turbulence, the complex dynamics of shock waves and the formation of various vortex structures. She also showed that the perturbations can improve the mixing and identified how this mixing enhancement depends on the parameters of the perturbation. This was performed both for supersonic jets in coflow and underexpanded supersonic jets in coflow.

Ms Akerkeh Zadauly's work is interesting, sound, and allows new insights into the investigated mixing process.

There are some things that I had requested some time ago to be corrected for the final printed version:

1. The references had to be corrected.
2. The bibliography had to be completed
3. Formatting had to be improved.

This has now been changed adequately.

In addition, I requested the following topics

1. A more detailed discussion on the resolution of the shocks by the numerical grid
2. Some information on the computer time needed should be added.
3. Several results for the vorticity and density are shown to characterize mixing. It would be interesting if a quantitative measure of the quality of the mixing were provided.

These topics were addressed sufficiently, although I think that a more detailed discussion would have been beneficial for the thesis.

Akerkeh Zadauly's collaboration with our research group

Ms Akerkeh Zadauly stayed at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Thermodynamics, during the dates from January 16 to March 22, 2020 to complete her internship under my supervision. During her internship she was performing numerical experiments on the stated problems in her dissertation using KIT's computing resources and as a result she presented a detailed report on the main issues and problems of dissertation together with the work done during her internship at a seminar. Furthermore, Miss Akerkeh Zadauly attended lectures by Docent V. Bykov which was beneficial for her investigations in the dissertation. Miss Akerkeh Zadauly never missed a single seminar organized in Institute of Thermodynamics on Thursdays every two weeks and showed herself as a qualified and hardworking researcher.

Summary

In summary of the above said I would recommend Ms Akerkeh Zadauly's thesis "Numerical simulation of a high-speed flow in a combustion chamber with an excited jet injection" to be accepted as fully satisfying for PhD degree.

Sincerely,



Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrich Maas

KIT | ITT | Улица Энгельберт-Арнольд 4,
Почтовый ящик | Карлсруэ

**Кафедра и институт технической
термодинамики**

Руководитель: проф. хаб. д-р.ест.н. Ульрих Маас
KIT - Технологический институт Карлсруэ
Телефон: 0721-608-46170
Факс: 0721-608
E-Mail: Ulrich.Maas@kit.edu
Веб-сайт: <http://www-itt.mach.uni-karlsruhe.de>
Ответственное лицо: Ульрих Маас
Наш знак: UM/

Рецензия на диссертацию г-жи Акерке Задаулы

«Численное моделирование высокоскоростного течения в камере сгорания со вдувом возмущённой струи» представленную к защите на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «Космическая техника и технологии» (код специальности 6D074600) Автор рецензии: профессор У. Маас, научный консультант диссертации

Примечание: Я не говорю по-русски. Поэтому мой отзыв основан на обсуждениях с соискателем, англоязычных текстах и аннотациях, которые были предоставлены мне, а также на переводе диссертации на немецкий язык с помощью Microsoft Word (который, к моему удивлению, дал очень хороший результат с точки зрения качества немецкого языка). Кроме того, г-жа Акерке Задаулы подробно представила мне свою работу во время нашей встречи на конференции в Бурбахе в сентябре прошлого года.

Контекст и актуальность работы:

Диссертация посвящена математическому и численному моделированию турбулентного сверхзвукового вдува струи в спутный поток, включающее детерминистическое возмущение на входных условиях для улучшения смешения струи и основного потока. Данный вопрос является фундаментальной задачей в области механики жидкости и аэродинамики.

Сверхзвуковые и гиперзвуковые силовые установки являются передовыми в аэрокосмической инженерии, обеспечивая полёты на скоростях, превышающих числа Маха 1 и 5, соответственно. Эти технологии двигателей включают физические явления, происходящие на высоких скоростях, где аэродинамический нагрев, ударные волны и быстрые процессы горения определяют основные механизмы работы.

Критическим аспектом этих силовых установок является смешение турбулентных струй, которое существенно влияет на эффективность горения и работу двигателя. Когда топливо впрыскивается в сверхзвуковой или гиперзвуковой воздушный поток, возникающие при этом турбулентные струи усиливают взаимодействие между топливом и окислителем, способствуя быстрому и эффективному сгоранию.

Технологический институт
Карлсруэ (KIT)
Кайзерштрассе 12
76131 Карлсруэ
Идентификационный номер
НДС DE266749428

Президиум:
Проф. д-р Ян С. Хестхавен
(президент), проф. д-р Оливер
Крафт,
проф. д-р Александр Ваннер,
проф. д-р Томас Хирт,
проф. д-р Кора Кристоф,
Михаэль Ганс

Банк LBBW/BW
IBAN: DE44 6005 0101 7495
5001 49
BIC/SWIFT: SOLADEST600

Банк LBBW/BW
IBAN: DE18 6005 0101 7495
5012 96
BIC/SWIFT: SOLADEST600

Сложность таких турбулентных течений, характеризующихся хаотическими флуктуациями скорости и сложными картинами смешения, создаёт серьёзные проблемы для инженеров и учёных. Понимание механизмов смешения турбулентных струй имеет решающее значение для оптимизации процессов горения, повышения удельной тяги и снижения вредных выбросов. Ведущиеся исследования используют передовые методы вычислительной гидродинамики и экспериментальные технологии для изучения динамики этих потоков.

Одной из ключевых проблем является быстрое смешение струи с основным потоком, и для его улучшения было предложено несколько методов (например, специальные сопла или каверны). Улучшение смешения турбулентных струй путем ввода дополнительного детерминистического возмущения является перспективным подходом для повышения эффективности горения и общей производительности силовых установок.

Турбулентные струи, характеризующиеся хаотическими картинами течения, содержат вихри различных масштабов и флуктуации, которые влияют на процесс смешения топлива и окислителя. Введение контролируемых возмущений, таких как колебания или возмущения на определённых частотах, позволяет значительно изменить динамику течения, что способствует более эффективному смешению.

В диссертации для численного моделирования процесса смешения используется метод LES («крупномасштабное моделирование вихрей»). Хотя сами уравнения для метода LES хорошо развиты, основной проблемой является разработка и выбор адекватных начальных и граничных условий, способных генерировать анизотропную, неоднородную трёхмерную турбулентность, так же, как и вычислительные затраты на решение основных уравнений.

На основе проведённых численных экспериментов были исследованы механизмы улучшения смешения вдуваемой сверхзвуковой сжимаемой неизобарической струи со сверхзвуковым основным потоком с использованием детерминистического возмущения струи. Исследования проводились на основе осреднённых по LES трёхмерных уравнений Навье-Стокса с гипотезой о совершенном газе (что упрощает расчёты и снижает точность, но при этом позволяет делать качественные выводы).

Анализ полученных результатов

В диссертации представлены два основных достижения: с одной стороны, были разработаны новые модели для численного моделирования, а с другой — проведены вычислительные эксперименты и их анализ. Результаты анализа позволили вывести рекомендации по улучшению процесса смешения.

В частности, Акерке Задаулы получила следующие результаты:

- Разработана численная модель вдува сверхзвуковой турбулентной струи совершенного газа в высокоскоростной спутный поток, основанная на осреднённых по пространству трёхмерных уравнениях Навье-Стокса, замыкаемых классической вязкостной моделью Смагоринского в рамках LES моделирования. Численное решение системы уравнений реализовано с использованием «существенно неосциллирующей» ENO схемы третьего порядка точности.
- Предложены граничные условия на входе, позволяющие реалистично генерировать анизотропную неоднородную трёхмерную турбулентность.

- Граничные условия дополнены дополнительным детерминистическим возмущением, которое используется для улучшения смешения струи со спутным потоком.
- Проведены численные эксперименты для широкого диапазона частот и амплитуд детерминистических возмущений, проанализировано их влияние на процесс смешения.
- Исследовано влияние соотношения давлений и чисел Маха на механизм формирования ударных волн и зоны смешения с помощью численного моделирования недорасширенных сверхзвуковых струй в сверхзвуковом спутном потоке.
- Определены перспективные параметры детерминистического возмущения, ведущие к улучшению смешения.

Г-жа Акерке Задаулы показала в своей диссертации, что разработанная численная модель с расширенными граничными условиями способна моделировать трёхмерную естественную турбулентность, сложную динамику ударных волн и формирование различных вихревых структур. Она также продемонстрировала, что введение возмущений может улучшить смешение и определила, как эффективность этого процесса зависит от параметров возмущения. Это исследование было выполнено как для сверхзвуковой струи в спутном потоке, так и для системы недорасширенных сверхзвуковых струй в спутном потоке.

Работа г-жи Акерке Задаулы является интересной, обоснованной и даёт новые знания о процессе смешения, который был предметом исследования.

Ранее я запрашивал внесение следующих корректировок в окончательную печатную версию диссертации:

1. Исправление списка литературы.
2. Дополнение библиографии.
3. Улучшение форматирования.

Эти изменения были внесены надлежащим образом.

Кроме того, я рекомендовал рассмотреть следующие аспекты:

1. Более детальное обсуждение разрешающей способности численной сетки при моделировании ударных волн.
2. Добавление информации о вычислительных затратах (затраченное процессорное время).
3. Представлены различные результаты для завихренностей и плотностей, характеризующие процесс смешения. Было бы полезно дополнительно включить количественные показатели качества смешения.

Эти вопросы были достаточно проработаны, хотя, на мой взгляд, более детальное обсуждение пошло бы на пользу диссертации.

Сотрудничество Акерке Задаулы с нашей исследовательской группой

KIT

Технологический институт Карлсруэ

Г-жа Акерке Задаулы проходила стажировку в Институте термодинамики Технологического института Карлсруэ (KIT) с 16 января по 22 марта 2020 года под моим руководством. В ходе стажировки она проводила численные эксперименты по вопросам, рассматриваемым в её диссертации, используя вычислительные ресурсы KIT. В результате она представила подробный отчёт по основным проблемам диссертационной работы и проделанной в рамках стажировки работе на семинаре.

Кроме того, г-жа Акерке Задаулы посещала лекции доцента В. Быкова, что принесло пользу её исследованию. Она не пропустила ни одного семинара, организованного Институт термодинамики по четвергам раз в две недели, и зарекомендовала себя как квалифицированный и трудолюбивый исследователь.

Заключение

Подводя итог вышесказанному, я рекомендую принять диссертацию г-жи Акерке Задаулы **«Численное моделирование высокоскоростного течения в камере сгорания со вдувом возмущённой струи»** как полностью соответствующую требованиям для присуждения степени доктора философии (PhD).

С уважением,

/подпись/

Проф. хаб. д-р.ест.н.Ульрих Маас